

KHẢ NĂNG BẢO VỆ CHỐNG ĂN MÒN THÉP CACBON CỦA MÀNG SƠN EPOXY GIÀU KẼM KẾT HỢP VỚI ỐNG NANO CACBON

Phạm Gia Vũ*, Vũ Kế Oánh, Trịnh Anh Trúc, Tô Thị Xuân Hằng

Viện Kỹ thuật nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt nam

Đến Tòa soạn 23-12-2014; Chấp nhận đăng 26-8-2015

Abstract

The zinc rich epoxy coatings containing carbonnanotube (CNT) concentrations ranged from 0.5 to 3 % were studied. Morphology of the zinc pigments was examined by scanning electron microscopy (SEM). Mechanical properties as impact and adhesion of the zinc rich epoxy containing CNT were excellent in comparison with zinc rich epoxy. The corrosion protection behaviour of a zinc-rich epoxy coating containing CNT in 3 % NaCl solution was study by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and the salt fog Testing. The EIS results and the Salt Fog testing show that the ability to corrosion protection of the zinc coating has been increased in the presence of 1 % of the CNT.

Keywords. Carbon nanotube, zinc-rich paint, coating, epoxy, corrosion.

1. MỞ ĐẦU

Bảo vệ chống ăn mòn kim loại là vấn đề đang được các quốc gia hết sức quan tâm bởi thiệt hại do ăn mòn gây ra rất lớn, thiệt hại do ăn mòn hàng năm chiếm khoảng 3,1 đến 3,3 % tổng thu nhập quốc dân của thế giới tương đương với khoảng 1,8 ngàn tỷ USD (chưa kể đến ảnh hưởng môi trường, tai nạn...). Nước ta có bờ biển dài, khí hậu nhiệt đới nóng ẩm quanh năm nên tốc độ ăn mòn các công trình xảy ra càng mạnh hơn. Vì vậy việc bảo vệ cho các cấu kiện sắt thép ở nước ta đóng một vai trò rất quan trọng trong việc phát triển kinh tế, xây dựng và bảo vệ đất nước.

Công nghệ sơn lót giàu kẽm đã được nghiên cứu trong nhiều năm trước đây, ứng dụng trong các lĩnh vực chống ăn mòn cao như ngành công nghiệp hàng hải, các công trình dân dụng đặc biệt và lĩnh vực quân sự. Lớp sơn giàu kẽm có thể được sử dụng như một lớp phủ duy nhất hoặc như một lớp phủ thành phần của hệ sơn. Hệ sơn có thể bao gồm sơn lót giàu kẽm và các lớp sơn phủ trên bề mặt có tác dụng trang trí và đồng thời cũng có tác dụng bảo vệ chống ăn mòn cho các bề mặt thép [1]. Các pigment hy sinh như kẽm được sử dụng với nồng độ lớn để đảm bảo độ dẫn điện cho màng sơn. Ở giai đoạn ban đầu của bột kẽm trong màng khi tiếp xúc với bề mặt thép và dung dịch điện ly đóng vai trò như một anốt hy sinh tạo ra dòng điện để bảo vệ catot. Sau một thời gian làm việc, bột kẽm trong màng bị ăn mòn tạo thành oxit kẽm hoặc hydroxit kẽm có tác dụng như một pigment ức chế ăn mòn trong màng sơn, khi đó

màng lại hoạt động theo cơ chế bảo vệ che chắn [2]. Khi lượng lớn sản phẩm kẽm bị ăn mòn khả năng tiếp xúc điện giữa các hạt kẽm và các bề mặt thép bị suy giảm. Vì vậy, nó có thể dẫn đến giảm hoặc mất vai trò bảo vệ theo cơ chế bảo vệ catot.

Độ dẫn điện của lớp phủ là cần thiết để đảm bảo cho lớp phủ hoạt động bảo vệ cho các bề mặt thép. Do vậy, để tạo được độ dẫn điện cho màng sơn, người ta phải đưa một lượng lớn bột kẽm vào màng sơn để đảm bảo độ dẫn điện của màng. Vì vậy các tính chất cơ lý của màng dễ dàng bị thay đổi mà đặc biệt là độ bám dính.

Để nâng cao khả năng bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn giàu kẽm, trong thời gian gần đây việc nghiên cứu và phát triển các lớp sơn giàu kẽm kết hợp với các loại pigment khác để nâng cao khả năng bảo vệ của lớp sơn giàu kẽm đồng thời làm giảm hàm lượng kẽm trong sơn cũng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Các loại polyme dẫn như polyanilin [3, 4] và polypyrrol [5] được thêm vào thành phần sơn giàu kẽm để làm giảm dòng anốt và tránh làm phân lớp sớm catot. Theo đó các loại polyme dẫn có thể làm giảm nồng độ các hạt kẽm mà vẫn đảm bảo khả năng liên kết và dẫn điện của màng đảm bảo cho các hạt kẽm vẫn làm được nhiệm vụ của anốt hy sinh, bên cạnh đó, polyme dẫn cũng làm tăng tính chất che chắn của lớp phủ có khả năng ức chế chống ăn mòn [6]. Tuy nhiên, các loại polyme dẫn như polyanilin, polypyrrol tương hợp với các loại polyme kém, làm giảm độ bám dính của polyme nền lên kim loại do đó làm giảm tính chất bảo vệ chống ăn mòn của lớp phủ.

Một trong những phụ gia hiện nay đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu sử dụng trong lĩnh vực vật liệu polyme nano compozit là ống nano cacbon (CNT) do có nhiều tính chất ưu việt như độ bền kéo đứt và modul đàn hồi cao tùy theo từng loại cấu trúc [7]. CNT có tính dẫn nhiệt, dẫn điện như một kim loại hoặc chất bán dẫn tùy thuộc vào độ tinh khiết [8]. Do vậy, CNT có thể gia cường và làm thay đổi tính chất của polyme tính chất cơ lý, dẫn điện và quang học của polyme.

CNT đơn vách và đa vách cũng đã được các nhà khoa học trên thế giới nghiên cứu sử dụng như một chất gia cường làm gia tăng một số tính chất đặc biệt của lớp phủ polyme nanocompozit như hấp phụ sóng điện từ, dẫn điện, dẫn nhiệt và đặc biệt là tính chất bám dính [9]. CNT cũng được coi là vật liệu tiềm năng trong các lớp phủ nanocompozit để bảo vệ chống ăn mòn, một số lớp phủ như epoxy, polyuretan chứa CNT có khả năng chống ăn mòn mạnh, bám dính cao, bền từ ngoại và tính chất cơ lý tốt hơn hẳn so với vật liệu polyme nền. Sự gia tăng các tính chất đó được chứng minh do sự phân tán và sự tương tác của CNT với polyme làm mạng lưới polyme compozit trở nên dày đặc hơn. Ngoài ra, trong các lớp phủ chống ăn mòn, sự gia tăng điện trở chuyển dịch điện tích khi có mặt CNT đã được ghi nhận [10].

CNT cũng có vai trò nâng cao khả năng che chắn bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn [11], cùng với kích thước rất nhỏ, diện tích bề mặt riêng rất lớn cùng với tính chất dẫn điện của CNT nên việc sử dụng kết hợp CNT với bột kẽm ở trong sơn có thể làm giảm nồng độ kẽm trong sơn mà vẫn đảm bảo được khả năng dẫn điện của màng sơn để bảo vệ theo cơ chế anốt hy sinh. Hơn thế nữa CNT có khả năng gia cường nâng cao tính chất cơ lý của màng sơn làm cho màng sơn giàu kẽm vừa có tác dụng bảo vệ chống ăn mòn theo cơ chế che chắn đồng thời có khả năng bảo vệ chống ăn mòn theo cơ chế anốt hy sinh. Hướng nghiên cứu sử dụng CNT trong sơn giàu kẽm là hướng đi mới góp phần tạo ra lớp phủ vừa có độ bền cao đồng thời có khả năng bảo vệ chống ăn mòn thân thiện với môi trường. Vì vậy, trong công trình này chúng tôi sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của CNT đến tính chất cơ lý và khả năng bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn epoxy giàu kẽm.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Nguyên liệu

Ống nano cacbon (CNT) do Viện Khoa học Vật Liệu, Viện Hàn Lâm Khoa Học và Công Nghệ Việt Nam chế tạo có đường kính ống 15-90 nm, và có độ tinh khiết là 97,9 %.

Bột kẽm kỹ thuật của Trung Quốc.

Nhựa epoxy EPON™ Resin 828, của Hãng Hexion, Mỹ.

Chất đóng rắn Ancamine 2753 trên cơ sở amin vòng của hãng Air Products.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

- *Phương pháp phổ tổng trở điện hóa*: sử dụng hệ 3 điện cực, điện cực làm việc là tấm thép phủ màng sơn, điện cực so sánh calomel bão hòa, điện cực đối platin. Các phép đo được thực hiện trên máy Autolab PG30 (Hà Lan) tại Viện Kỹ thuật nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Môi trường xâm thực là dung dịch NaCl 3 %, diện tích bề mặt sơn tiếp xúc với môi trường xâm thực là 16 cm².

- *Phương pháp kính hiển vi điện tử quét*: các mẫu được chụp trên máy Hitachi S-4800 thuộc Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Kính hiển vi điện tử quét được sử dụng để nghiên cứu hình thái cấu trúc của màng epoxy kẽm và CNT.

- *Phương pháp đo tính chất cơ lý màng sơn*: Tính chất cơ lý của màng xác định thông qua độ bám dính của màng được xác định bằng phương pháp kéo giết theo tiêu chuẩn ASTM D 4541 sử dụng thiết bị ADHESION TESTER model 525 và độ bền va đập được xác định theo tiêu chuẩn ISO 6272 trên thiết bị Erischen model 304.

- *Phương pháp thử nghiệm mù muối*: các mẫu sơn sau khi chế tạo được đặt nghiêng theo góc 45° trong tủ Q-FOG, nhiệt độ trong buồng phun mù muối là 35°C, theo tiêu chuẩn thử nghiệm ASTM B-117, Viện Kỹ thuật nhiệt đới.

2.3. Chế tạo màng sơn epoxy/Zn CNT

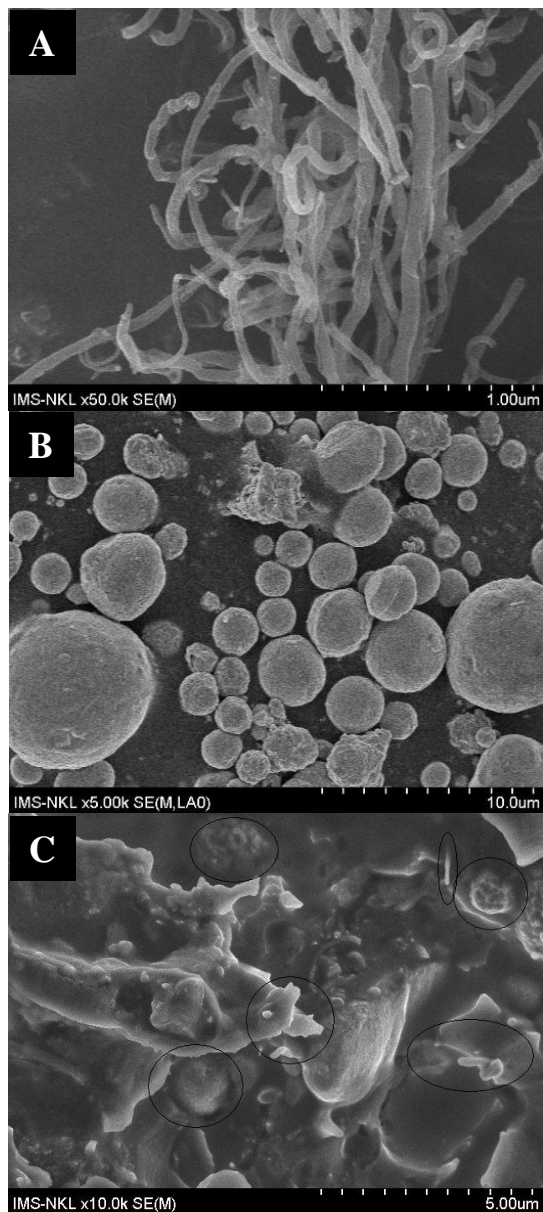
CNT và Zn được đưa vào nhựa epoxy với hàm lượng xác định theo yêu cầu của quá trình thí nghiệm và được nghiền trên máy nghiền bi. Mẫu thép được làm sạch dầu mỡ bằng xà phòng, rửa sạch bằng nước cất, etanol, sấy khô. Màng được chế tạo bằng quay ly tâm trên máy Filmfuge 1110N (Sheen) tại Viện Kỹ thuật Nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Chiều dày màng sau khi khô khoảng 30 μm.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hình thái cấu trúc của màng epoxy/Zn CNT

Trên hình 1A, 1B và 1C tương ứng là ảnh FESEM của CNT, bột kẽm (Zn) và mặt cắt của màng epoxy/Zn/CNT với tỉ lệ 70 % khối lượng bột

kẽm và 1 % khối lượng CNT. Sự phân bố hạt kẽm và CNT trong nền nhựa epoxy được quan sát thông qua việc quan sát mặt cắt của màng epoxy/Zn/CNT. Các hạt kẽm và CNT được bao phủ bởi màng epoxy và phân bố tương đối đồng đều trong nền nhựa epoxy (hình 1C).



Hình 1: Ảnh FESEM của CNT (A), bột kẽm (B) và mặt cắt màng epoxy/Zn 1 % CNT (C)

3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nồng độ Zn đến tính chất của màng epoxy

Trong phần nghiên cứu này hàm lượng bột kẽm trong màng epoxy được giữ không đổi 70 % khối lượng so với nhựa epoxy, nồng độ CNT thay đổi từ 0-3 %. Các mẫu được đo độ bám dính, bền va đập và độ bền uốn, kết quả được trình bày trong bảng 1.

Độ bám dính của màng tăng nhẹ với nồng độ CNT trong khoảng 0,5-2 %, giảm nhẹ với hàm lượng CNT 3 % tuy nhiên vẫn đạt giá trị cao ($> 5 \text{ N/mm}^2$).

Độ bền va đập của màng sơn epoxy giàu kẽm chứa CNT tăng đáng kể so với mẫu sơn giàu kẽm không chứa CNT, giá trị độ bền va đập của màng sơn giàu kẽm chứa CNT cao nhất đạt được tương ứng với hàm lượng CNT 2 %.

Độ bền uốn của màng sơn chứa 0,5-2 % CNT cũng tăng đáng kể so với mẫu sơn giàu kẽm không chứa CNT và chứa 3 % CNT.

Độ bền va đập, độ bám dính và độ bền uốn của màng sơn tăng là do CNT có vai trò gia cường cho màng epoxy giàu kẽm. Các ống các bon có cấu trúc nano đan xen vào mạch epoxy làm gia tăng độ chặt chẽ của màng và có vai trò gia cường cho màng [11].

Bảng 1: Tính chất cơ lý của màng epoxy chứa 70 % Zn với hàm lượng CNT khác nhau

STT	Tỉ lệ CNT (% KL)	Độ bám dính (N/mm^2)	Độ bền va đập (kg.cm)	Độ bền uốn (mm)
1	0	5,29	75	2
2	0,5	5,38	90	1
3	1	5,61	120	1
4	2	5,32	145	1
5	3	5,26	100	2

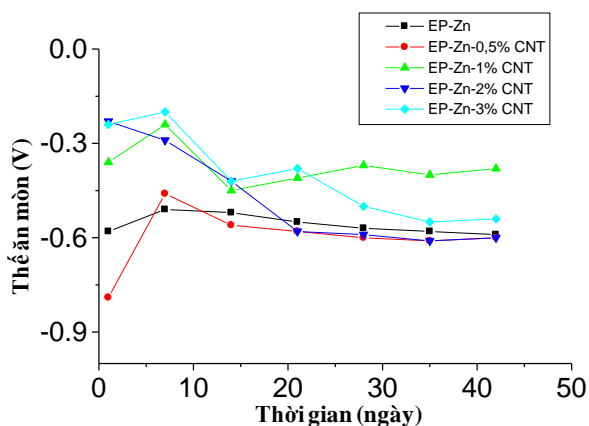
3.3. Tính chất bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn epoxy/Zn CNT

3.3.1. Tổng trở điện hóa

Khả năng bảo vệ chống ăn mòn của các màng sơn đối với nền thép trước tiên được nghiên cứu bằng phương pháp tổng trở điện hóa theo thời gian ngâm trong dung dịch chất điện ly. Hàm lượng của Zn không thay đổi, chiếm 70 % khối lượng, hàm lượng CNT thay đổi từ 0,5-3 %. Sự biến đổi thể ăn mòn của các mẫu epoxy/Zn và epoxy/Zn chứa các hàm lượng CNT khác nhau theo thời gian ngâm trong dung dịch NaCl 3 % được trình bày trên hình 2.

Trên hình 2 là đồ thị thể ăn mòn của các mẫu sơn theo thời gian ngâm trong dung dịch NaCl 3 %, ngay từ ban đầu giá trị thể ăn mòn của mẫu sơn epoxy/Zn và epoxy/Zn-0,5 % CNT đều có giá trị thấp hơn giá trị thể ăn mòn của thép trần trong dung dịch NaCl 3 % điều này có thể là do ngay từ ban đầu chất điện ly đã ngấm đến bề mặt thép và xảy ra quá

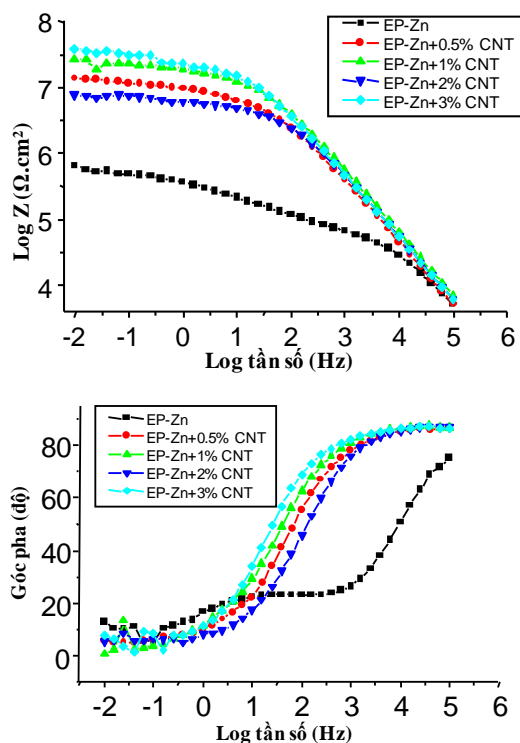
trình ăn mòn các hạt kẽm. Thế ăn mòn của các mẫu sơn chứa 1-3 % CNT có giá trị cao hơn thế ăn mòn của thép trần trong dung dịch NaCl 3 %. Sau khoảng 7 ngày ngâm trong NaCl 3 %, thấy thế ăn mòn của các mẫu sơn đều có xu thế tăng lên. Theo H. Leidheiser [12], thế ăn mòn dịch về phía anốt chứng tỏ quá trình anốt bị kìm hãm, lúc này kẽm dưới tác dụng chất điện ly có thể đã chuyển hóa thành hydroxit kẽm hoặc oxit kẽm có tác dụng ức chế tạo cho thế ăn mòn cao hơn. Sau 14 ngày, các mẫu sơn có thể dịch về phía catot, dao động xung gần với thế của thép trần. Khi thế ăn mòn dịch về phía catot chứng tỏ quá trình ăn mòn đã bắt đầu diễn ra bên dưới lớp phủ, nền thép phía dưới lớp sơn đã tiếp xúc trực tiếp với dung dịch điện ly của môi trường xâm thực gây ra quá trình ăn mòn.



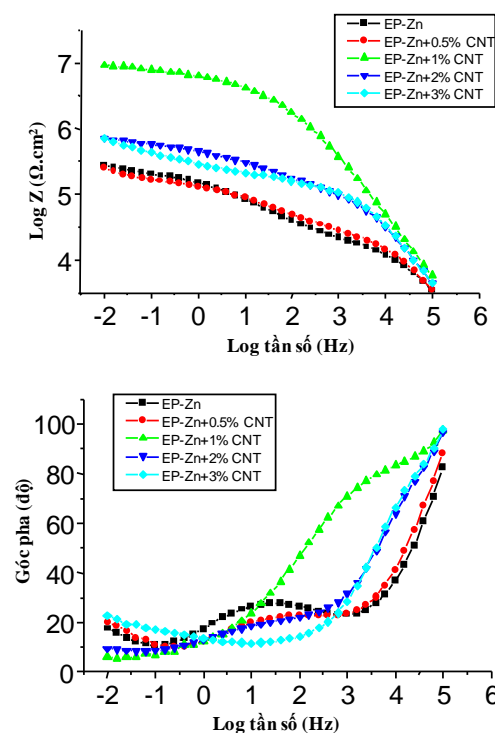
Hình 2: Sự biến đổi thế ăn mòn các mẫu sơn trên nền thép theo thời gian ngâm trong dung dịch NaCl 3 %

Đối với mẫu sơn epoxy/Zn chứa 1 % CNT, thế ăn mòn vẫn cao hơn so với thế ăn mòn của thép trần điều này chứng tỏ rằng tuy chất điện ly đã ngấm qua màng nhưng quá trình ăn mòn vẫn chưa xảy ra.

Trên hình 3 là phổ tổng trở dạng Bode của các màng sơn epoxy/Zn chứa hàm lượng CNT khác nhau sau 1 ngày ngâm trong dung dịch NaCl 3 %. Các màng sơn epoxy/Zn chứa CNT phổ có 1 điểm uốn ở vùng tần số cao. Màng sơn epoxy/Zn phổ có 2 điểm uốn tại vùng tần số cao và thấp, phần vùng tần số cao đặc trưng cho đặc tính ngăn cách của màng, vùng tần số thấp đặc trưng cho các quá trình điện hóa xảy ra tại ranh giới màng/kim loại [13]. Như vậy màng sơn epoxy/Zn sau một ngày ngâm trong dung dịch điện ly đã ngấm đến bề mặt thép và đồng thời quá trình điện hóa đã diễn ra. Giá trị mô đun tổng trở vùng tần số cao của màng epoxy/Zn chứa CNT cao hơn màng epoxy/Zn, cho thấy khả năng ngăn cách cao hơn.



Hình 3: Phổ tổng trở của mẫu sơn trên nền thép sau 1 ngày ngâm trong dung dịch NaCl 3 %

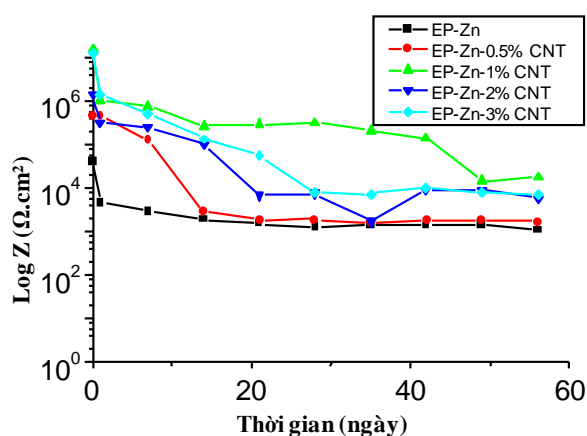


Hình 4: Phổ tổng trở của các mẫu sơn trên nền thép sau 42 ngày ngâm trong dung dịch NaCl 3 %

Sau 42 ngày ngâm trong dung dịch NaCl 3 %, giá trị mô đun tổng trở ở tần số thấp của các mẫu sơn giàu kẽm chứa 2 % và 3 % CNT bị suy giảm một chút so với mẫu sơn epoxy/Zn chứa 1 % CNT

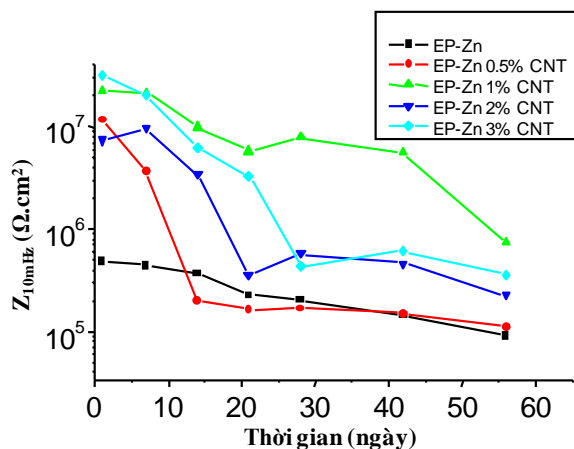
nhưng vẫn cao hơn so với giá trị modul tổng trở của mẫu sơn epoxy/Zn và mẫu sơn giàu kẽm chứa 0.5% CNT (hình 4).

Khả năng bảo vệ chống ăn mòn của các màng sơn còn được đánh giá thông qua việc nghiên cứu sự biến đổi giá trị điện trở màng của các mẫu sơn theo thời gian ngâm trong dung dịch điện ly. Hình 5 cho thấy giá trị điện trở màng của các mẫu sơn chứa CNT đều cao hơn giá trị điện trở màng của mẫu sơn chỉ chứa kẽm. Điều này cho thấy CNT có vai trò che chắn làm tăng giá trị điện trở màng của các mẫu sơn. Giá trị điện trở màng của mẫu sơn chứa 1 % CNT có giá trị cao nhất chứng tỏ rằng với tỉ lệ này màng sơn có cấu trúc chặt chẽ nhất.



Hình 5: Sự biến đổi giá trị điện trở màng của các mẫu theo thời gian ngâm trong dung dịch NaCl 3 %

Mô đun tổng trở ở tần số thấp $Z_{100\text{mHz}}$ cũng là một thông số rất quan trọng để đánh giá độ bền ăn mòn của màng sơn. Mô đun tổng trở $Z_{100\text{mHz}}$ đặc trưng cho quá trình ăn mòn diễn ra trên bề mặt kim loại. Sự biến đổi giá trị điện trở phân cực theo thời gian được trình bày trên hình 6.



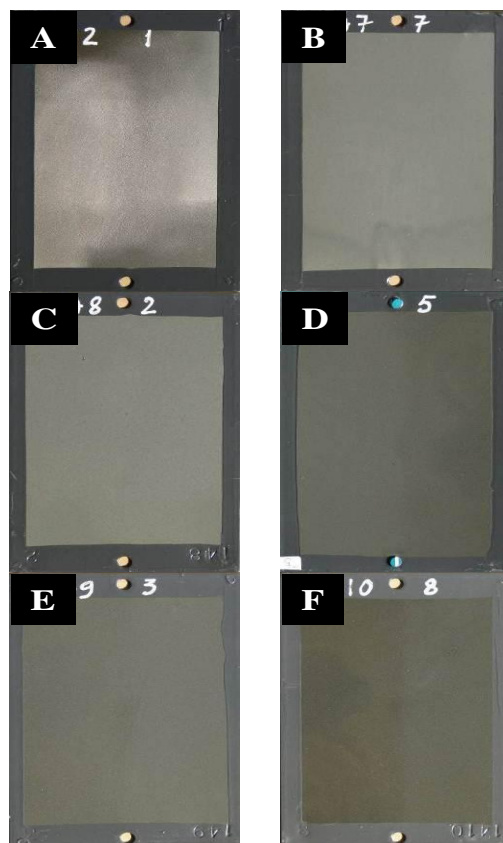
Hình 6: Giá trị $Z_{100\text{mHz}}$ các mẫu sơn trên nền thép theo thời gian ngâm trong dung dịch NaCl 3 %

Sau thời gian ngâm trong dung dịch điện ly, giá trị mô đun tổng trở ở tần số thấp của các mẫu đều suy giảm. Với các mẫu chứa hàm lượng CNT trên 1 % vẫn duy trì được giá trị mô đun tổng trở $Z_{100\text{mHz}}$ cao hơn so với mẫu sơn epoxy chứa kẽm và kẽm với 0,5 % CNT, mô đun tổng trở của mẫu epoxy /Zn chứa 1 % CNT có giá trị cao nhất, chứng tỏ rằng mẫu sơn này có khả năng bảo vệ chống ăn mòn tốt nhất.

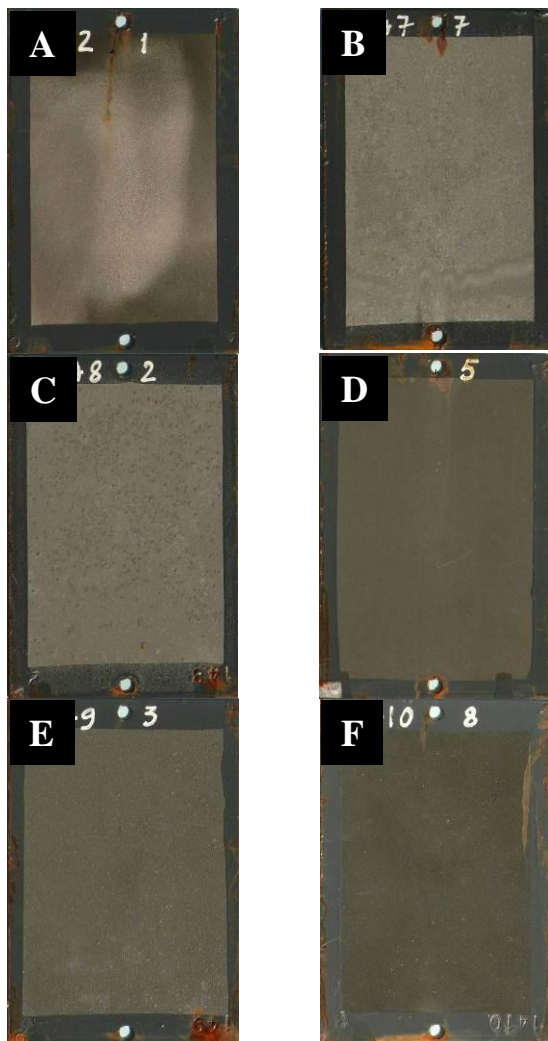
Như vậy với một hàm lượng CNT nhỏ đã làm thay đổi tính chất che chắn của màng sơn epoxy/Zn. Với khoảng 1 % CNT tính chất che chắn của màng sơn epoxy/Zn thay đổi nhiều nhất, điều này chứng tỏ rằng với tỉ lệ này CNT đã điền đầy các khoảng trống giữa các hạt kẽm tạo cho màng có cấu trúc chặt chẽ hơn.

3.3.2. Thử nghiệm gia tốc mù muối

Tính chất bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn giàu kẽm còn được đánh giá qua phương pháp thử nghiệm gia tốc mù muối. Trên hình 7 là ảnh của các mẫu sơn giàu kẽm với tỉ lệ CNT khác nhau trước khi thử nghiệm mù muối.



Hình 7: Ảnh mẫu sơn epoxy (A), mẫu sơn epoxy chứa 70 % Zn (B), mẫu sơn epoxy chứa 70 % Zn + 0,5 % CNT (C), 70 % Zn + 1% CNT (D) và 70 % Zn + 2 % CNT (E), và 70 % Zn + 3 % CNT (F) trước khi thử nghiệm mù muối



Hình 8: Ảnh mẫu sơn epoxy (A), mẫu sơn epoxy chứa 70 % Zn (B), mẫu sơn epoxy chứa 70 % Zn + 0,5 % CNT (C), 70 % Zn + 1 % CNT (D) và 70 % Zn + 2 % CNT (E), và 70% Zn + 3 % CNT (F), sau 700 giờ thử nghiệm mù muối

Sau 700 giờ thử nghiệm mù muối mẫu sơn epoxy đã xuất hiện điểm gỉ, mẫu sơn epoxy/Zn (hình 8A) xuất hiện mảng lớn bị phồng rộp, mẫu sơn epoxy/Zn+ 0,5 % CNT (hình 8B) có nhiều điểm nhỏ phồng rộp chứng tỏ rằng bề mặt thép dưới lớp sơn đã bị ăn mòn và suy giảm độ bám dính.

4. KẾT LUẬN

- Nồng độ CNT trong khoảng từ 0,5-3 % làm gia tăng thêm một số tính chất cơ lý của màng sơn như độ bền uốn và độ bền va đập. Màng sơn epoxy chứa khoảng 70 % bột Zn và khoảng 1-2 % CNT cho tính chất cơ lý của màng tốt nhất.

- CNT làm thay đổi tính chất che chắn bảo vệ chống ăn mòn của màng sơn giàu kẽm. Với tỷ lệ CNT 1 % trong sơn giàu kẽm chứa 70 % hàm lượng

kẽm màng sơn có tính chất bảo vệ chống ăn mòn tốt nhất.

Lời cảm ơn. Công trình này được hỗ trợ kinh phí nghiên cứu từ Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (đề tài VAST 03.05/15-16); kinh phí từ đề tài cấp cơ sở Viện Kỹ thuật nhiệt đới, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. N. Hammouda, H. Chadli, G. Guillemot, K. Belmokre. *The corrosion protection behaviour of zinc rich epoxy paint in 3 % NaCl solution*, Adv. Chem. Eng. Sci., **1**, 51-60 (2011).
2. K. Schaefer, A. Miszczyk. *Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc*, Corrosion Science, **66**, 380-391 (2013).
3. A. Meroufel, C. Deslouis, S. Touzain. *Electrochemical and anticorrosion performances of zinc-rich and polyaniline powder coatings*, Electrochimica Acta, **53**, 2331-2338 (2008).
4. Jian Hou, Guang Zhu, Jingkun Xu, Huajian Liu. *Anticorrosion Performance of Epoxy Coatings Containing Small Amount of Inherently Conducting PEDOT/PSS on Hull Steel in Seawater*, J. Mater. Sci. Technol., **29**(7), 678-684 (2013).
5. András Gergely, Imre Bertóti, Tamás Török, Éva Pfeifer, Erika Kálmán. *Corrosion protection with zinc-rich epoxy paint coatings embedded with various amounts of highly dispersed polypyrrole-deposited alumina monohydrate particles*, Progress in Organic Coatings, **76**(1), 17-32 (2013).
6. András Gergely, Zoltán Pászti, Judith Mihály, Eszter Drotár, Tamás Török. *Galvanic function of zinc-rich coatings facilitated by percolating structure of the carbon nanotubes. Part II: Protection properties and mechanism of the hybrid coatings*, Progress in Organic Coatings, **77**, 412-424 (2014).
7. N. P. O'Brien, M. A. McCarthy, W. A. Curtin. *A theoretical quantification of the possible improvement in the mechanical properties of carbon nanotube bundles by carbon ion irradiation*, Carbon **53**, 346-356 (2013).
8. Hosam A. Shawky, So-Ryong Chae, Shihong Lin, Mark R. Wiesner. *Synthesis and characterization of a carbon nanotube/polymer nanocomposite membrane for water treatment*, Desalination, **272**(1-3), 46-50 (2011).
9. Stefanie A. Sydlik, Jae-Hwang Lee, Joseph J. Walish, Edwin L. Thomas, Timothy M. Swager. *Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives*, Carbon, **59**, 109-120 (2013).
10. Anwar Aglan, Aldinton Allie, Adriane Ludwick, Lawrence Koons. *Formulation and evaluation of*

- nano-structured polymeric coatings for corrosion protection*, Surface & Coatings Technology, **202**, 370-378 (2007).
11. Phạm Gia Vũ, Nguyễn Anh Sơn. *Nghiên cứu biến tính bề mặt ống nano cacbon bằng hợp chất silan để chế tạo lớp phủ epoxy nanocompozit bảo vệ chống ăn mòn cho thép cacbon*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, **51**, 125-134 (2013).
12. H. Leidheiser. Journal of Coatings Technology, **53(678)**, 29 (1981).
13. Trinh Anh Truc, To Thi Xuan Hang, Vu Ke Oanh, Eric Dantras, Colette Lacabanne, Djar Oquab, Nadine Pébère. *Incorporation of indole-3 butyric acid modified clay in an epoxy resin for corrosion protection of carbon steel*, Surface & Coatings Technology, **20**, 4945-4951 (2008).

Liên hệ: Phạm Gia Vũ

Viện Kỹ thuật nhiệt đới

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Số 18, Hoàng Quốc Việt, Cầu Giấy, Hà Nội

E-mail: pgiavu@yahoo.com.